

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GRAFIČKI FAKULTET ZAGREB

ZAVRŠNI RAD

Filip Spajić

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GRAFIČKI FAKULTET ZAGREB

Smjer: Tehničko-Tehnološki

ZAVRŠNI RAD

UTJECAJ KOLIČINE I VRSTE ISPUNE U 3D TISKU
TEHNIKOM FUZIJSKOG TALOŽENJA

Mentor:

Red. prof. dr. sc. Nikola Mrvac

Student:

Filip Spajić

Zagreb, 2019.

SAŽETAK:

Moderno doba je sa sobom donijelo mnogo napretka u tehnološkom pogledu. Istekom patentnog vlasništva i nastankom inicijative RepRap nastaje velika zajednica entuzijasta zainteresiranih za tehnologije aditivne proizvodnje poznatiji pod nazivom 3D tisak. U ovom radu će se istraživati kako količina ispune i vrsta uzorka ispune utječu na vrijeme potrebno za izradu samog trodimenzionalnog objekta. Za istraživanje je odabrana tehnologija 3D tiska fuzijskim taloženjem (Fused Filament Fabrication – FFF), koja je danas najraširenija i cjenovno najpovoljnija tehnologija aditivne proizvodnje. Za 3D tisak modela koristiti će se Polyacid – PLA, biorazgradiva termo plastika.

SADRŽAJ:

1. UVOD	.....1
2. TEORIJSKI DIO	.....2
2.1 Povijest FDM / FFF tehnologije	.....2
2.2 Opis principa rada tehnologije	.....3
2.3 Formati zapisa za 3D tisak	.....5
2.3.1 STL Format	.....6
2.3.2 OBJ Format	.....6
2.4 Materijali za FFF tehnologiju	.....7
2.4.1 Termoplastika	.....7
2.4.2 Kompozitni polimeri	.....8
2.5 Izrada 3D modela za 3D tisak fuzijskim taloženjem	.....9
2.5.1 Strukturna podrška	.....9
2.5.2 ABC (ili YHT) podrške FFF-a	.....10

2.5.3 Vrste FFF podrške	.....11
2.5.4 Premošćivanje	.....12
2.5.5 Anizotropija	.....13
2.5.6 Prednosti i ograničenja	.....13
2.6 Ispuna	.....14
3. PRAKTIČNI DIO	.....19
4. REZULTATI I RASPRAVA	.....20
4.1 Koncentrična (Concentric) ispuna	.....20
4.2 Križaste (Cross) ispuna	.....21
4.3 Mrežasta (Grid) ispuna	.....22
4.4 Linijska (Lines) ispuna	.....23
4.5 Trokutasta (Triangles) ispuna	.....24
4.6 Cik Cak (Zig Zag) ispuna	.....25
4.7 Analiza	.....27
5. ZAKLJUČAK	.....28
6. LITERATURA	.....29
7. PRILOZI	.....31

1. UVOD

3D tisak je moderna tehnologija proizvodnje koja se služi aditivnim procesom izrade materijala. Tehnologija radi na principu dodavanja sloja na sloj izgrađujući pri tome objekt kojeg je dizajner zamislio. Taj način izrade omogućuje dizajneru izradu objekata koje bi bilo teško proizvesti, uz veliki trošak, u klasičnoj proizvodnji (izrada kalupa i lijevanje materijala za izradu). Nakon što je istekao patent za tehnologiju nastaje inicijativa RepRap koja stvara veliku zajednicu entuzijasta koji su zainteresirani za tehnologiju aditivne proizvodnje (3D tisak) [1]. RepRap inicijativa je pokrenula masovnu proizvodnju 3D printera koji su dostupni za relativno malu cijenu i omogućuje korisniku izradu 3D objekata. [2] Moguća je i izrada novog RepRap printera kroz dijelove ako korisnik ima dovoljno materijala i vremena za sastaviti ga. Time su 3D printeri bili dostupni gotovo svima koji su ih tražili.

Za ovaj rad odabrana je tehnologija 3D tiska: fuzijskim taloženjem (Fused Filament Fabrication-FFF). Danas je FFF tehnologija najrasprostranjenija i najpovoljnija tehnologija aditivne proizvodnje. Istraživati će se kako različite količine ispune i vrste uzorka utječu na vrijeme proizvodnje i potrošnju materijala potrebnu za izradu 3D objekta. Istraživanje će se bazirati na izradi više 3D objekata i njihovoj procijeni prema dobivenim podacima iz računalnih programa koji služe za pripremu modela za 3D. Računalni program koji se koristi je Ultimaker Cura (program otvorenog koda) [3].

Cilj je preko dobivenih podataka izvući zaključak gdje ćemo ustanoviti koja vrsta ispune je najisplativija, vremenski i financijski, za korištenje u proizvodnji te isplativost ostalih s obzirom na situaciju (kućna proizvodnja i industrijska). S time da različite vrste ispune imaju drugačija svojstva i funkcije (elastičnost i čvrstoća) rezultat bi trebao pokazati najoptimalniju ispunu.

2. TEORIJSKI DIO

2.1 Povijest FDM / FFF tehnologije

U ranim 1980-ima izumitelji Hideo Kodama i Chuck Hull, iz eksperimentalnih tehnika 3D tiska stvaraju komercijalnu tehnologiju koja brzo postaje prihvaćena sa strane milijuna ljudi svuda oko svijeta. [4] S. Scott Crump je u kasnim 1980-ima razvio tehnologiju 3D tiska *Fused Deposition Modeling* – FDM, osnovao tvrtku Stratasys i zaštitio naziv FDM. [5]

Ideju za 3D printere je dobio 1988 godine kada je htio napraviti igračku za svoju kćer koristeći pištolj s vrućim ljepilom. Proces automatizacije izrade slojeva je glavna stvar zbog koje je nastao Stratasys kojeg je osnovao 1989. godine s svojom ženom Lisom Crump. 2009. godine je nastala eksplozija na tržištu 3D printera gdje je Crump dobio mogućnost patentiranja FDM tehnologije. Zbog nemogućnosti korištenja naziva FDM (Filament Deposition Modeling) tvorci novih printera su iskoristili naziv FFF (Fused Filament Fabrication).

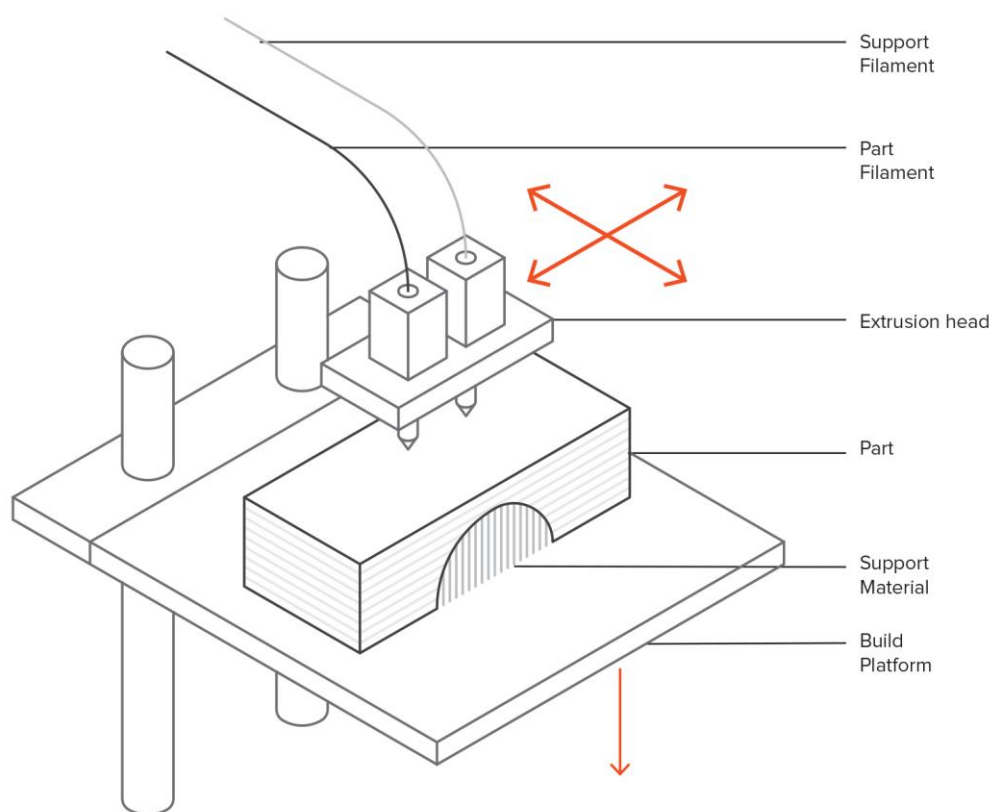
U 2005. je nastala inicijativa RepRap, gdje su korisnici mogli napraviti vlastite printere po prihvatljivoj cijeni. Iz te inicijative niknuo je i novi poznati Američki brend MakerBot koji je u 2013. kupljen od strane Stratasysa. [6] Kada je prvi put 2009. istekao patent Stratasysa na FDM tehnologiju, entuzijasti su napravili svoje DIY 3D printere i stavili ih na prodaju. Kompanije kao što su Makerbot i Lulzbot su postale jedne od najpoznatijih kompanija za izradu DIY pribora za printere dok je Makerbot postao multimilijarder s procjenom na \$400M. [7] Danas su 3D printeri jako pogodni za bilo koje prostore ali nisu uvijek bili takvi, nego su kroz 1980-te bili veličine malih dizalica. 3D tisak ima dosta veliku i bogatu povijest kroz 1980.-2015. godine pa sve do danas gdje nastavlja inovirati nove i naprednije tehnologije. [8]



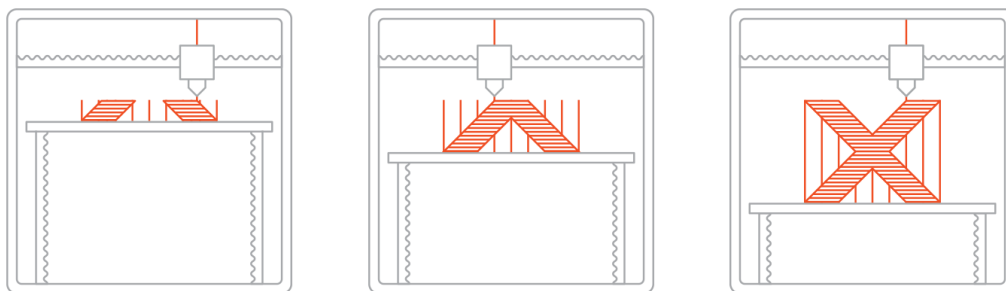
Slika 1.1 – Novi printer F120 od Stratasysa (<https://www.advancedtek.com/stratasys-announces-new-products-for-h1-2019/>)

2.2 Opis rada FFF tehnologije

FFF tehnologija radi na principu zagrijavanja filamenta i nanošenja sloja na sloj materijala. Princip rada je takav da se u ekstruder stavlja kolut od materijala u formi žice, koji prolazi do glave ekstrudera koja se zagrijava na željenu temperaturu te materijal prolazi kroz nju topeći se putem. Nakon topljenja filamenta glava se pomiče po uzorku kojeg je odredio dizajner i sjeda na podlogu na kojoj se printa objekt. Tamo se filament hladi i stvrđnjava s vremenom tvoreći željeni objekt kako se platforma spušta sloj po sloj prema dolje omogućujući glavi da printa nove slojeve. [9]



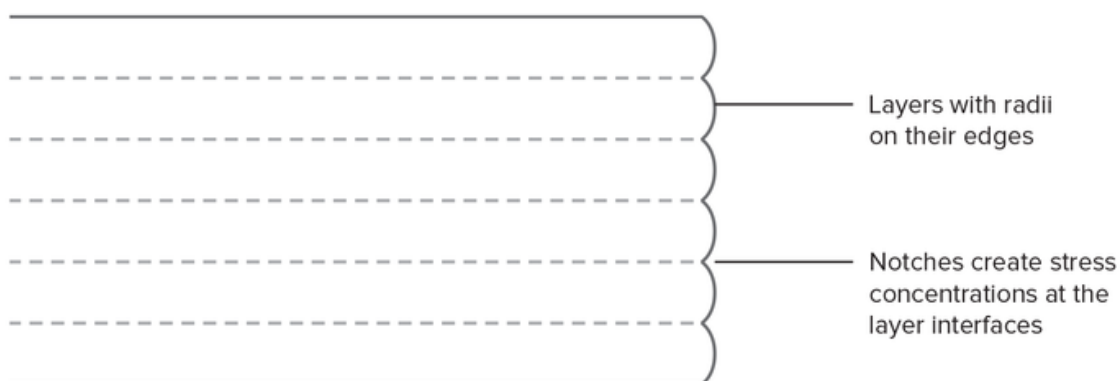
Slika 1.2 – Shema 3D printera (<https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-fdm-3d-printing>)



Slika 1.3 – Prikaz printanja sloj po sloj (<https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-fdm-3d-printing>)

Kod hlađenja slojeva moguća je deformacija elementa zbog različitih brzina hlađenja svakog sloja. Zbog toga u materijalu dolazi do unutarnjih naprežanja u kojima dolazi do savijanja i izobličenja objekta. Ako imamo dobro prijanjanje u sloju i dobar grijani sloj, može se ograničiti vjerojatnost deformacija ili izobličenja.

Važnu ulogu u procesu 3D tiska ima i adhezija sloja. Kako bi se stvorio čvrsti, kohezivan dio, filament se mora vezati i očvrnuti s prethodno tiskanim slojem. Kako bi se to postiglo na prethodne slojeve se pritisne novi filament koji ponovo zagrijava i tali prethodni sloj. To djelomično ponovno taljenje temeljnog materijala i sila koja ga gura dolje omogućuju spajanje starog sloja s novo tiskanim slojem. Zbog toga je oblik filamenta FFF zapravo ovalnog oblika a ne kružnog. [10]



Slika 1.4 – Prikaz oblika FFF objekta (<https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-fdm-3d-printing>)

Pošto su slojevi ovalni, oni zapravo poprimaju oblik kao malih dolina. Zbog toga nastaje naprezanje sloja gdje se mogu formirati pukotine kada je podvrgnut opterećenju i dovodi do inherentnog anizotropnog ponašanja i grublje površine otisnutih dijelova te slojevitog izgleda.



Slika 1.5 – Prikaz slojevitog objekta nakon printa (<https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-fdm-3d-printing>)

2.3 Formati zapisa za 3D tisak

Postoji jako puno ekstenzija za datoteke u svijetu 3D modeliranja, neki 3D softveri koriste vlastite ekstenzije, kao npr., SketchUp koristi svoje SKP ekstenzije, SolidWorks koristi SLDPRT ekstenziju itd. Naime softveri kao što je Blender je više fleksibilan sa tipovima datoteka koje se mogu importati i isto tako eksportati iz njega. Ima jako puno ekstenzija za 3D datoteke ali svega par njih su postale standard kod korištenja u 3D strojevima. Sve što se treba napraviti ako nije datoteka podržana od strane softvera je dodati ekstenziju za format u program i datoteka se može čitati. Najosnovnija ekstenzija u svijetu 3D modeliranja je STL format ali polako gubi tu bitku kako ga i ostatak formata polako dostiže, pogotovo s pojavom multikolor 3D printera. Kako bi se uopće moglo koristiti te datoteke za izradu, treba se držati osnovnog pravila, objekt mora biti zatvoren ili u profesionalnom izrazu vodooporan. Sve strane objekta moraju biti u savršenom poklapanju da se sve pukotine i otvori zatvore, što se zna desiti kod eksportiranja objekta u programu da neke stranice ostanu otvorene. [6]

2.3.1 STL Format

STL format je kreiran od strane 3D Systems kompanije kao prirodna ekstenzija na njihov Stereolithography softver koji se koristi za tehnike rapidnog prototipiranja istog imena. STL se naziva Standard Tessellation Language, i standardni je format većini alata za izradu te je najkorišteniji u 3D tisku. STL mesh predstavlja geometriju trodimenzionalnog objekta s time da ne spominje njegovu boju, materijal ili teksturu, STL datoteka se zato naziva amnezijskom datotekom. Datoteka ne sadržava prijašnje informacije svog oblikovanja i može zagubiti informaciju o svojoj originalnoj mjernoj jedinici, prebacujući ih iz matrične mjerne jedinice u imperijske (inch). To se može desiti kada se STL datoteka radi u omjeru 1:100. Neki softveri čak dopuštaju korisniku odabir mjerne jedinice kada importiraju STL datoteku. Moguće je odabrati gustoću mesha kada se eksportira STL datoteka ali će to imati direktan utjecaj na izradu površine djela i na veličinu datoteke. Postoje dvije vrste STL datoteka: Binarni i ASCII. Binarne datoteke se najčešće koriste zato što su kompaktnije za rezoluciju. [11]

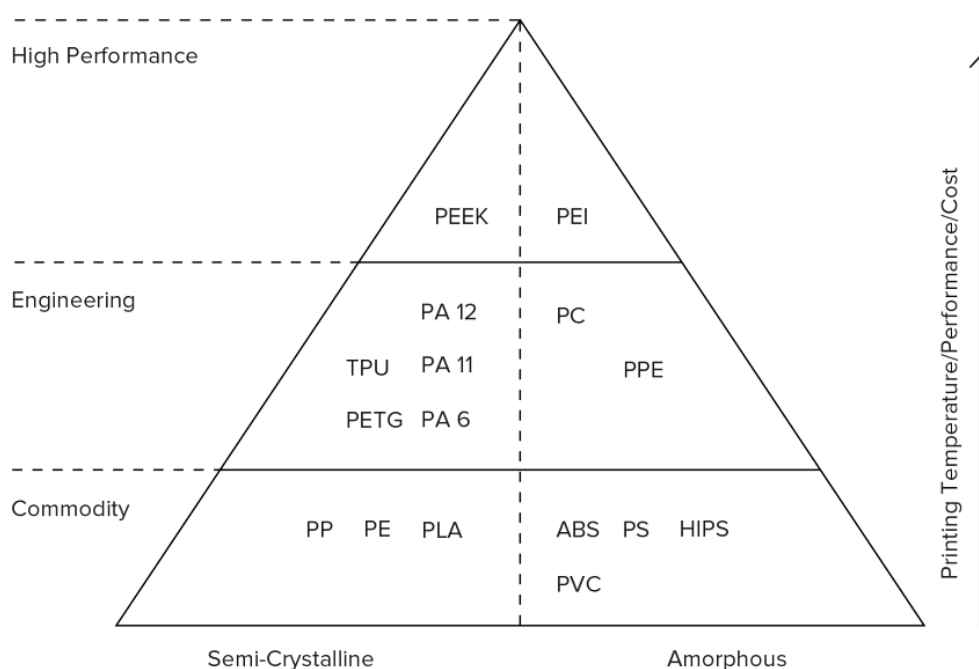
2.3.2 OBJ Format

OBJ format je izrađen od strane Wavefront Technologies za pakete animacijskih softvera pa zbog tog razloga se taj tip naziva Wavefront datoteka od strane starijih specijalista za računala. OBJ je otvorenog formata i preuzet je od mnogo 3D dizajnera. Postoji samo par 3D softvera koji ne podržavaju OBJ format importiranja i eksportiranja baš kao i STL-u te isto tako nema prijašnjih informacija o svojem nastanku nego predstavlja samo geometriju objekta. Naime, OBJ ima dvije prednosti nad drugim formatima dobivajući time popularnost među grafičkim dizajnerima. Prva i osnovna prednost, prihvaća NURBS stil površina omogućavajući izradu kompleksnijih zakrivljenih površina bez potrebe za jako velikom gustoćom elementa. [12] Druga prednost je da OBJ je suplementaran od jedne ili više MTL (Material Template Library) datoteka zadržavajući informaciju o svojoj boji i teksturi koja dolazi s 3D objektom. MTL je još jedan standard kreiran od strane Wavefront-a koji spominje materijale u knjižnici tekstura. Zbog MTL-a omogućen je prikaz multikolor datoteka i proizvodnji istih računavajući njihove kromatske kompleksnosti. Naravno, u 3D tisku nije moguće reproducirati transparentnost i refleksiju materijala. [13]

2.4 Materijali za FFF tehnologiju

2.4.1 Termoplastika

Materijal koji se koristi za FFF ispis je termoplastika, koja dolazi u koluvima, promjera 1.75mm ili 3mm. To su najjeftiniji materijali u 3D tisku koji koštaju oko \$20 - \$40 za 1kg materijala. Postoje i visokokvalitetni materijali poput PEEK-a koji koštaju više od \$500 za 1kg materijala. Prednost FFF materijala je ta da dolaze u više različitih boja. Kod termoplastike postoji jedno opće pravilo, što su bolje inženjerske karakteristike materijala, to je viša temperatura potrebna za zagrijavanje do topivog stanja i zato je materijal teži za ispis. Veće temperature u tisku nisu nužno dobre zbog povećavanja vjerojatnosti deformacije materijala tijekom procesa tiskanja, s time da se dijelovi hlade većom brzinom, nastaje intenzivnije unutarnje naprezanje.



Slika 1.6 – Piramida termoplastičnih materijala (<https://www.core77.com/posts/71173/How-To-Find-the-Best-3D-Printing-Material-for-Your-Designs>)

Piramida prikazuje popis materijala koji se koristi u FFF tisku, što je materijal na većem mjestu u piramidi to je veća temperatura potrebna da se obradi i ima bolje inženjerske osobine. ABS i PLA materijali su na dnu piramide ali se smatraju jednostavnim materijalom za ispis, dok su materijali poput PEEK i PEI na vrhu i nude izvrsne inženjerske karakteristike

ali se većinom ispisuju pomoću industrijskih strojeva koji im omogućavaju veću kontrolu ispisa. [10]

2.4.2 Kompozitni polimeri

Termoplastika može biti impregnirana s drugim materijalima velike snage poboljšavajući njihova mehanička svojstva ili im dajući nove jedinstvene karakteristike. SLS prah, može biti popunjen s česticama karbona, aluminijske, grafita i stakla poboljšavajući njihova mehanička svojstva, čvrstoću, termalnu otpornost i trošenje. Dijelovi koji se impregniraju s karbonskim vlaknima, kevlarom ili staklenim vlaknima mogu biti proizvedeni kroz FFF proces tiskanja. Tako dobivamo materijale koji imaju omjer snaga/težina koji se može uspoređivati s metalom. Postoje i egzotični filamenti poput PLA ispune s drvom i metalom rezultirajući jedinstvenom izgledu objekta. [14]



Slika 1.7 – Jedinstven „egzotični“ izgled PLA materijala s drvenom i metalnom ispunom (<https://www.core77.com/posts/71173/How-To-Find-the-Best-3D-Printing-Material-for-Your-Designs>)

2.5 Izrada 3D modela za 3D tisak fuzijskim taloženjem

2.5.1 Strukturna podrška

Strukturna podrška je potrebna za uspješan ispis ako su kosine objekta ispod kuta od 45 stupnjeva u odnosu na podlogu. Ako se želi nadograđivati sloj na sloj, novi slojevi se ne mogu otisnuti na zrak, mora se dodati podrška kako bi se sloj otisnuo na njoj. Tako je omogućeno otisnuti elemente koje inače ne bi bilo moguće otisnuti. Iako je moguće otisnuti elemente koji su ispod 45 stupnjeva površina počinje patiti u kvaliteti. Ako se želi održati dobra kvaliteta površine preporučuje se držanje granice do 45 stupnjeva. Potpora ima i lošu stranu, a to je što loše utječe na površinu objekta s kojim je bila u kontaktu tako što rezultira grubljom površinom. Za dobivanje glatke površine potrebna je naknadna obrada. Rastopiva podrška je jedna od opcija kod ispisivanja elementa pošto novi FFF printeri imaju dvostruku glavu za ispis te mogu ispisivati s više materijala. Obično se podrška topi u vodi ili drugom otapalu i zbog toga je površina otiska superiorno obrađena. Ako se printa s podrškom to obično povećava cijenu i vrijeme proizvodnje zbog rastopivog materijala.

Podrška omogućuje precizno ispisivanje elemenata koji su u kutu ispod 45 stupnjeva.



Slika 1.8 – Prikaz kutova koji ispod 45 stupnjeva (<https://www.3dhubs.com/knowledge-base/key-design-considerations-3d-printing>)

Loša strana podrške je što ima učinak koji štetno djeluje na površinu elementa i korištenjem razgradive potpore možemo ublažiti taj učinak. Orijentacija dijelova je važna za mjesto i količinu podrške koju ispis zahtjeva. [15]

2.5.2 ABC (ili YHT) podrške FFF-a

Primjer strukturne podrške možemo vidjeti na primjeru slova YHT.



Slika 1.9 – Strukturna podrška za slova YHT (<https://www.3dhubs.com/knowledge-base/supports-3d-printing-technology-overview>)

Slovo Y se može ispisati bez potpore, iako su mu ruke ispružene pod 45 stupnjeva ili više.

Slovo H je kompliciranije u izradi. Ono ima most u sredini ali pravilo vrijedi ako je most manji od 10 mm ne treba mu potpora i može se ispisati bez oslonca. U ovom slučaju je most veći od 10 mm pa je potrebno ispisati potporu slovu.

Slovo T će zahtijevati potporu zato što nema ništa na što bi se moglo osloniti dok se tiskaju i materijal bi pao bez nje. U nekim slučajevima se kratki konzolni dijelovi mogu uključiti bez oslonca ali moraju biti ispod 3 mm. [16]



Slika 1.10 - Slovo T bez i sa potporom (<https://www.3dhubs.com/knowledge-base/supports-3d-printing-technology-overview>)

Kod nekih zakrivljenih dijelova nije potrebna podrška u cijeloj površini već samo po onoj koja je ispod 45 stupnjeva pa se tako s selektivnim stavljanjem potpore može smanjiti potrošnja materijala, vremena i cijena.

2.5.3 Vrste FFF podrške

Imamo 3 različita stila podrške u FFF-u: topivi, drvo i harmonika. FFF printeri koji imaju dvije glave mogu ispisivati podršku iz topivog materijala koji se otapa u vodi ili kemijskoj otopini. Prednost svega toga je što je uklanjanje podrške mnogo jednostavnije te će površina biti ravnija. U to spada i manja cijena izrade, zato što ako imamo podršku koja se može rastvoriti cijena proizvodnje bi se povećala zbog dodatne potrošnje materijala.

Ako se želi printati s topivom podrškom materijali se moraju uskladiti kako bi se osigurala potrebna adhezija sloja između materijala za tiskanje i topive podrške. Kombinacije PLA s PVA i ABS s HIPS su najčešće kod FFF topivih materijala i materijala za tiskanje (otopljenim u omjeru 1:1 (R) – (+) –Limonen i Izopropil alkohola).

Najčešći stil podrške za pisače s jednom glavom je harmonična podrška zato što je pogodan za većinu FFF ispisa zbog svoje jednostavne geometrije. Harmonična podrška zahtjeva čak i više materijala nego stil drva pa je stoga cijena ispisa povećana.

Stil drva je manje popularan ali ga preferiraju neki pisači. Kod stila drva velika prednost je što ima jako malo kontakta s objektom te mu je s time bolja površinska obrada. Nedostatak ovog stila je ipak vidljiv, on nudi manju stabilnost objekta pri tiskanju što ga čini neprikladnim za kompleksnije ispise koji su ovisni o podršci. Stil s razgradivim materijalom će uvijek davati bolju površinsku obradu ali mu je zato povećan trošak i vrijeme tiskanja. Odluka sasvim leži u iskustvu operatera printera, koja će podrška biti najbolja za dani objekt. Orijentacija materijala je jako važna zato što će prema njoj slicer programi generirati podršku za ispis. Preko orijentacije se može shvatiti da će gornja površina i površina u kontaktu s podlogom imati najbolju površinsku obradu. Dizajner određuje prioritet za mjesta gdje je potrebna podrška, iako štednja materijala s uklanjanjem podrške smanjuje troškove, rezultira lošijom kvaliteti objekta nakon ispisa zbog uklanjanja podrške gdje je bila potrebna. [17]

2.5.4 Premošćivanje

Most je jedina iznimka u FFF-u gdje je potreban materijal za podršku. Pojava premošćivanja se dešava kada je potreban ispis između dvaju nosača ili sidrenih točaka. Kako nema podrške za prvi sloj kod tiskanja, za izgradnju je potrebno premostiti prazninu, a materijal će se saviti. Mostovi se najčešće pojavljuju kod šupljih dijelova na gornjem sloju, odabir materijala također ima ulogu u dužini na koju se može otisnuti most. Mostovi ne zahtijevaju potporu na duljine manje od 10 mm a za sve više je potrebna. [18]



Slika 1.11 – Primjer selektivnog postavljanja podrške (<https://www.3dhubs.com/knowledge-base/supports-3d-printing-technology-overview>)

2.5.5 Anizotropija

Jedno od važnijih ograničenja FFF-a je anizotropna priroda dijelova koji imaju različita mehanička svojstva u različitim smjerovima (anizotropni materijali). Jedan primjer anizotropnog materijala je drvo, puno je lakše sjeći drvo u smjeru vlakna nego okomito na njega, na koji FFF dijelovi i liče. Često će se vidjeti da adhezija između slojeva određuje snagu FFF objekta, a ne materijal od kojeg je izrađen i potpuno ovisi o kalibraciji i postavkama printera za kojeg je odgovoran operater (dizajner).

Kako bi se stvorila mehanička adhezija, slojevi su pritisnuti jedan na drugi. Slojevi se tiskaju kao zaobljeni pravokutnici pa su između svakog sloja male doline. Te doline stvaraju naprezanja tamo gdje može nastati pukotina kada se dio stavi pod opterećenje. To može jako negativno utjecati na izvedbu cijelog dijela. Istraživanja pokazuju da vodoravno tiskani dijelovi imaju do 5 puta veću čvrstoću istezanja od vertikalno tiskanog dijela kada im je ispunjena 100%.

Kako anizotropnost ne bi negativno utjecala na izvedbu dijela mora se paziti na orijentaciju dijela tokom tiskanja. Za dijelove pod naponom vrijedi: smjer gradnje otiska treba biti orijentiran paralelno s opterećenjem. [19]

2.5.6 Prednosti i ograničenja

Prednosti FFF tehnologije su niska cijena strojeva i materijala te lakoća rukovanja strojem. Ona je prva tehnologija 3D ispisa s kojom se ljudi susreću i najveća je baza 3D pisaca na svijetu. FFF je najpopularniji za brzu izradu prototipova zbog širokog raspona dostupnih materijala, kao i neke aplikacije, većinom za nekomercijalnu upotrebu. Glavno ograničenje FFF-a je kod anizotropnosti objekta, slojeviti oblik FFF ispisa je rezultat objektima koji su poprilično slabiji u jednom smjeru. Kako je dio usmjeren tijekom procesa tiskanja ima utjecaj na njegovu čvrstoću u svim smjerovima. Glavno je da dizajner razumije svojstva objekta i kako će smjer utjecati na izvedbu. Postotak ispune također uvelike djeluje na snagu objekta, većina pisaca proizvodi objekte s 20% ispune kao standard. Ako se poveća postotak ispune onda se povećava i čvrstoća objekta te se povećava vrijeme proizvodnje i cijena izrade. Ako

dizajner želi glatku površinu, zbog slojevitosti FFF objekta potrebno je napraviti naknadnu obradu. [10]

2.6 Ispuna

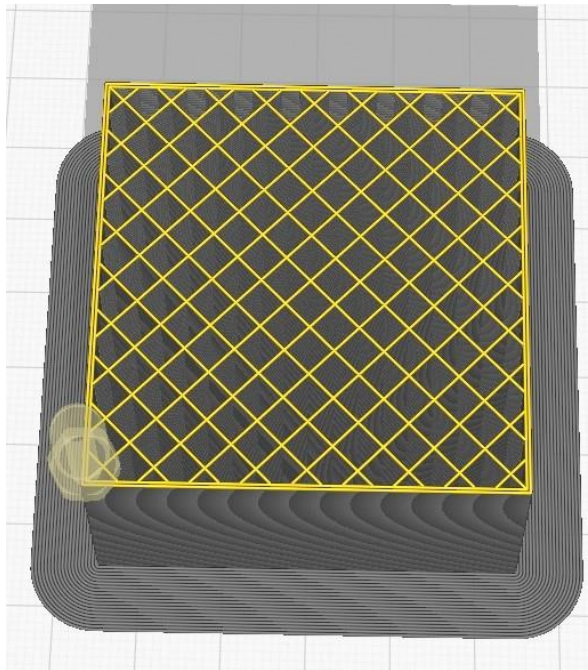
FFF otisci tipično su ispisani s ispunom male gustoće. Ona omogućuje jeftiniji i brzi ispis dijela, a njegova snaga se izravno odnosi na postotak ispune. Standardna ispunna za većinu 3D aplikacija je 20% i razumijevanje primjene tiskanog dijela omogućuje dizajneru da odredi pogodan postotak ispune. Za prototip u kojem je važan oblik može se ispisati s gustoćom ispune od 10%, dok će potpuna konstrukcija dijela koja će imati veće opterećenje trebati veći postotak ispune (do 100% ili potpuno gusto).

Kod standardnog ispisa ispuna je obično pravokutnog oblika. Četiri najčešća oblika ispune su: Pravokutni, Trokutasti, Cik-Cak i Med. Parametre ispune možemo definirati oko funkcije dijela. Makar je 20% standardni postotak ispune, povećanjem te vrijednosti utječemo na čvrstoću dijelova, a to direktno utječe na povećanje vremena tiskanja i dodatne troškove materijala. U primjenama montaže ili uvrtnja preporuča se korištenje ispune od barem 50%, a ako je čvrstoća kritična i poželjna je lagana struktura onda je najbolji odabir Med ili Trokutasta ispunna.

Par softvera za printane daju mogućnost promjene gustoće tokom tiskanja, pa se tako dobiva opcija za ispis veće gustoće na dijelovima gdje je potrebna veća čvrstoća. Na primjer, kod područja koje su pod velikim opterećenjem ili oko vijaka. Tako se može isto ispisati i manja gustoća na onim mjestima gdje čvrstoća nije toliko kritična.

Velika prednost 3D printanja je da neki dijelovi mogu biti i skoro šuplji. Ako se gleda s perspektive proizvodnje, to uštedje materijale i cijenu izrade te isto tako i težinu samog objekta, što uvelike uštedje na vremenu koje je inače u svijetu 3D printanja jako vrijedno. Obratit će se posebna pažnja na par ispuna koje variraju u gustoći, fleksibilnosti i čvrstoći: Mreža, Linije, Trokutasta, Cik Cak, Križ i Koncentrična ispunna. [20]

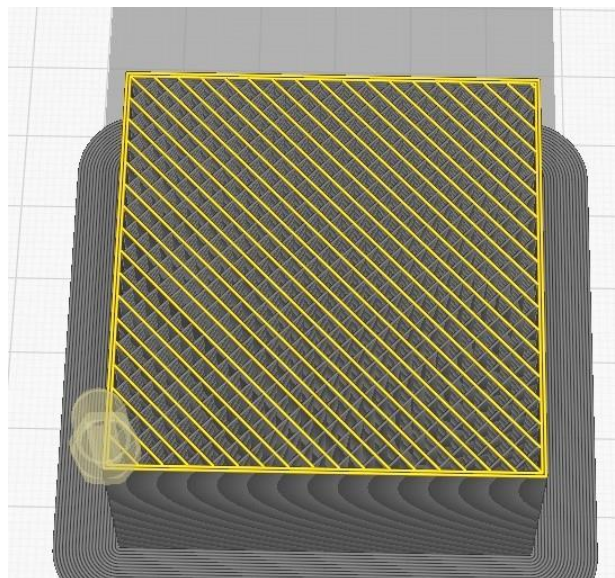
Mrežasta (Grid) ispuna:



Slika 1.12 – Grid ispuna

Mrežasta ispuna predstavlja standardni 2D oblik kojem je glavna prednost brzina printanja pošto je najmanje kompleksniji od svih.

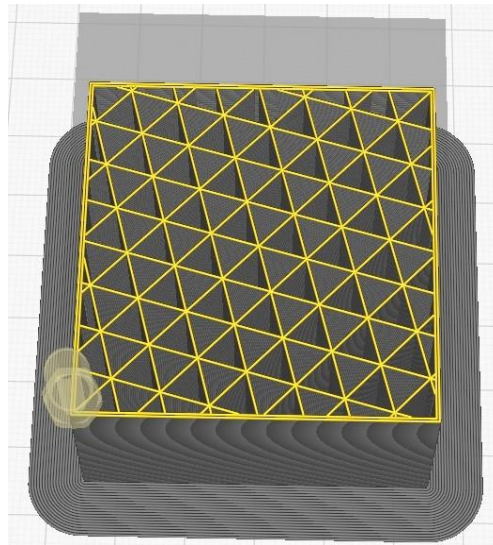
Linajska (Lines) ispuna:



Slika 1.13 - Lines ispuna

Linijska ispuna je najbolja ispuna za modeliranje. Nju se koristi kada se izrađuju modeli ili figure koje neće biti podložene velikome naporu niti im treba neka velika snaga. U tom slučaju ona je najbolji odabir pošto se i najbrže printa. Izgledom je skoro identična kao i Mreža ali se razlikuje u tome što se printa samo jedan smjer linija po sloju.

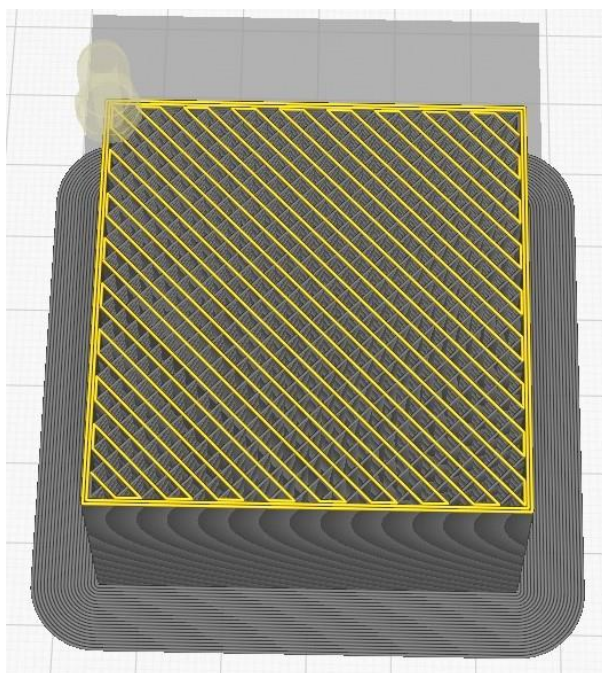
Trokutasta (Triangle) ispuna:



Slika 1.14 – Triangle ispuna

Trokutasta ispuna se sastoji od spoja 2D trokutića i ovaj stil ispune ima veliku prednost kod snage kada je teret primijenjen okomito na lice objekta. Isto tako se koristi za dijelove s tankim, trokutastim komponentama, koje imaju manju povezanost između zidova objekta.

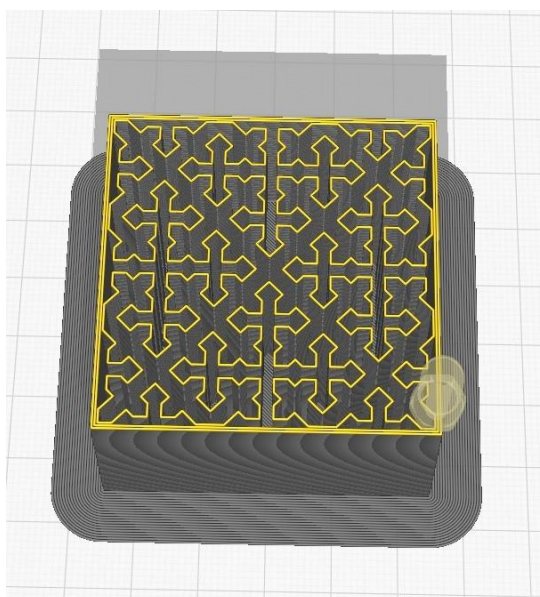
Cik Cak (Zig Zag) ispuna:



Slika 1.15 – Zig Zag ispuna

Cik Cak ispuna je sličan stilu Mreža ali ima karakteristiku Linijske ispune u tome da se ispuna printa u samo jednom dijagonalnom smjeru po sloju. Omogućuje modelu da bude mekan, okreće se ili komprimira. Može biti jako dobar izbor s mekanim gumenim materijalom ili mekšim najlonom.

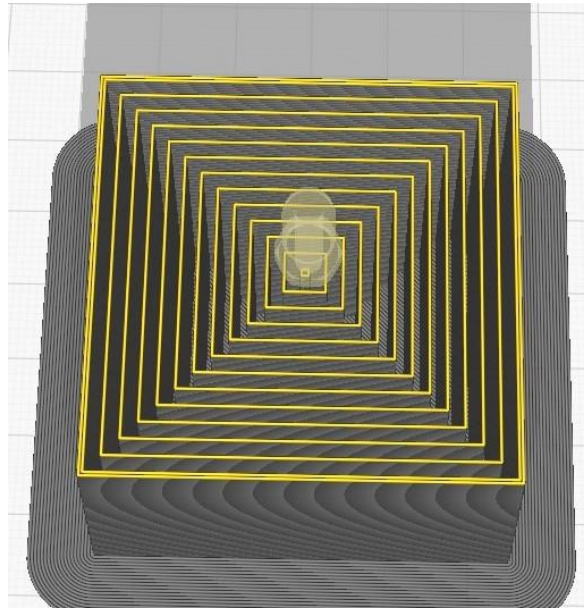
Križ (Cross) ispuna:



Slika 1.16 – Cross ispuna

Križ je još jedan 2D oblik koji daje oblik ispuni veoma nalik križevima. Križ ispuna nudi fleksibilnu ispunu. Prostor između križeva dopušta dizajneru da manipulira dijelom i savija ga te komprimira.

Koncentrična (Concentric) ispuna:



Slika 1.17 – Concentric ispuna

Koncentrična ispuna je 2D oblik koji reproducira „valove“ kroz unutrašnjost objekta, oponašajući ponašanje vode. Kada se baci kamenčić u vodu dogodi se efekt koncentričnih krugova na površini i taj efekt se replicira s ovom ispunom. Glavna karakteristika joj je fleksibilnost. [21]

3. PRAKTIČNI DIO

Prije početka ispitivanja trebalo bi potvrditi mogućnosti strojeva i programa kojeg ćemo koristiti za izradu objekata. To će se raditi zbog eliminacije potencijalnih varijabli i mogućnosti kontaminacije rezultata tokom samog izrađivanja objekta. Eliminirat će se sve stavke koje neće ulaziti u samu izradu elemenata (promjena geometrija modela i zapisa). Uz to koristit će se alati koji su dostupni fizički u obliku samog materijala i programski u obliku licenci. Zato će se koristiti materijali, programi i strojevi koji će biti dostupni tokom cijelog ispitivanja.

Prva stavka je geometrija oblika koja će poslužiti kao testni uzorak. Nakon razmatranja mogućnosti oblika odlučeno je da će se uzeti geometrija ploči za konzistenciju rezultata i preventiranje velikih devijacija zbog kompleksnijih modela. Taj odabir je postignut zbog mogućnosti bilo kojeg stroja za izradu tog objekta i žele se izbjeći problemi oko izrade kompleksnijih uzoraka ovom aditivnom metodom proizvodnje.

Nakon što se odabrala geometrija modela, slijedeća stavka je odabir FFF 3D printera koji će biti dostupan tokom cijelog ispitivanja. Razlog toga je prevencija devijacije rezultata koje bi mogla izazvati sama promjena 3D printera i bilo bi komplicirano i vremenski štetno kalibrirati sve postavke po kojima je radio prijašnji printer. Odabran je Prusa i3 mk3 3D printer.

Treća stavka je odabir samog materijala od kojeg će cijeli objekt biti izrađen. Želi se koristiti jedan materijal tokom cijelog ispitivanja, makar promjena materijala tokom ispitivanja ne bi činila veliku štetu što se tiče rezultata, ipak će se koristiti jedan filament u jednoj roli.

Odabrani je PLA (Polyactic Acid) tip filamenta.

Zadnja stavka je odabir programa koji će ostati isti tokom cijelog ispitivanja. S tim programom je osnovno da je verzija programa ista tokom ispitivanja zbog moguće promjene rezultata s dodavanjem druge verzije. Na tržištu postoji mnogo programa koji su dostupni za korištenje u ovom ispitivanju ali će se koristiti samo jedan koji je dostupan svima. Program je otvorenog koda i razvija se kroz same korisnike i pomoć kompanije FFF 3D printera Ultimaker. Program u pitanju je Ultimaker Cura zbog stabilnosti i mogućnosti čitanja potrebnih formata zapisa.

Dodatno će se koristiti Windows 10 operativni sustav zbog svoje podrške za odabrani program i 3D printer.

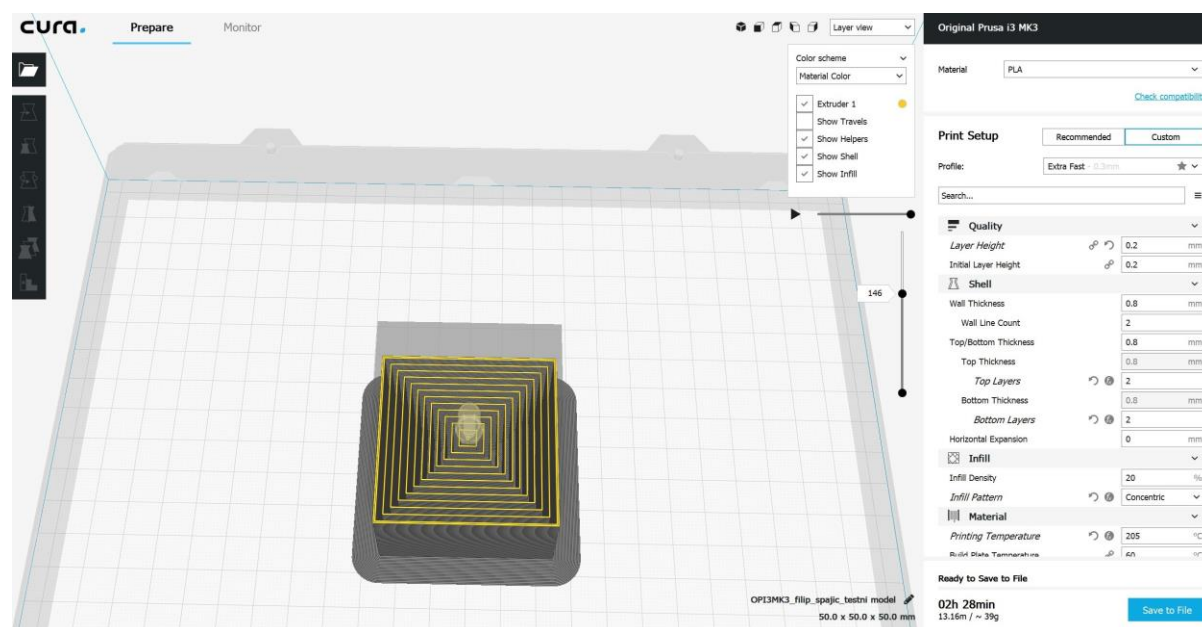
4. REZULTATI I RASPRAVA

Eksperiment se provodio s PLA materijalom pomoću Ultimaker Cura programa u Prusa i3 mk3 printeru kako je navedeno u prijašnjem djelu. izrađeni su testni objekti dimenzija 50 mm x 50 mm x 50 mm (d, š, v). Koristila se gustoća ispune od 20% i 40% te se usporedila brzina 3D tiska i vrijeme potrebno za izradu uz potrošnju materijala. U samome programu su postavljene na izradu kocke dimenzija 50 mm x 50 mm x 50 mm ali je proizvodnja prekinuta na 10mm u visini zbog brže fizičke izrade svih objekata ali rezultati uspoređivani će biti u skladu s originalno zamišljenim dimenzijama.

4.1 Koncentrična (Concentric) ispuna

Pri izradi su osim zadanih dimenzija korišteni slijedeći parametri: visina sloja 0.2 mm, debljina zida 0.8 mm s 2 sloja, temperatura printanja 205. Nazvali smo ga Profil 1.

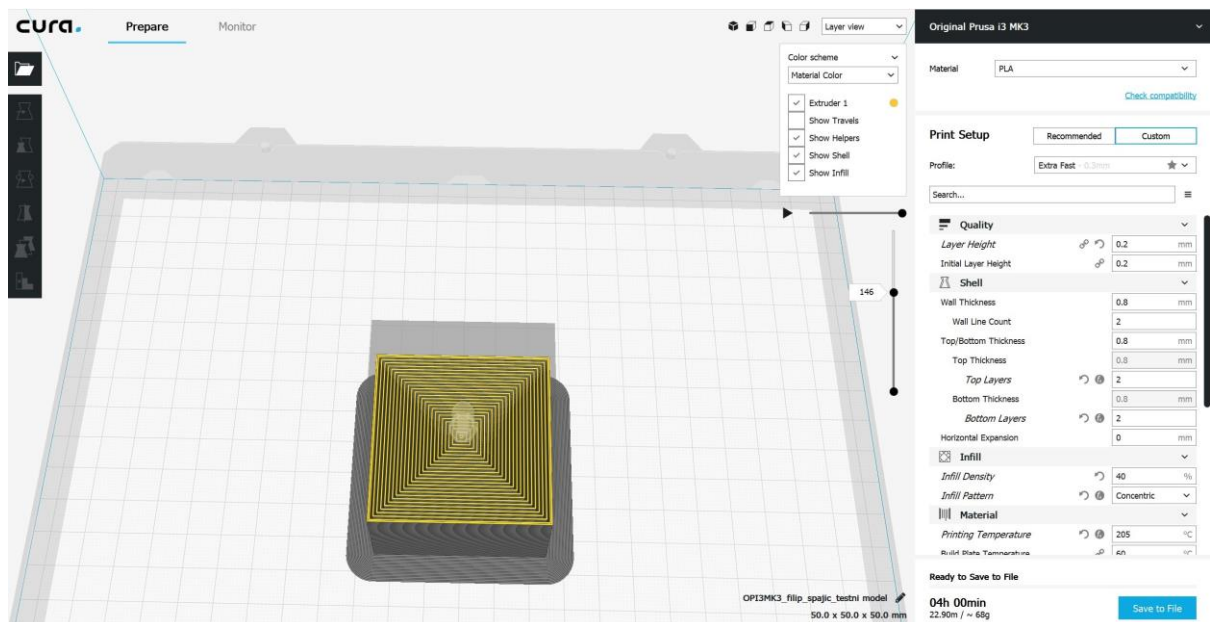
Iz priloženih podataka vidi se da je potrošnja materijala 13.16 metara što je otprilike 36 grama filameta. Cjelokupna proizvodnja ovog objekta bi trajala 2 sata i 28 minuta na 20% ispune.



Slika 2.1 - Koncentrična ispuna od 20%

Kod izrade objekta s ispunom gustoće 40% korišteni su parametri Profila 1.

Potrošnja materijala je 22.90 metara što čini 68 grama filameta. Proizvodnja ovog objekta ima trajanje od 4 sata na 40% ispune.

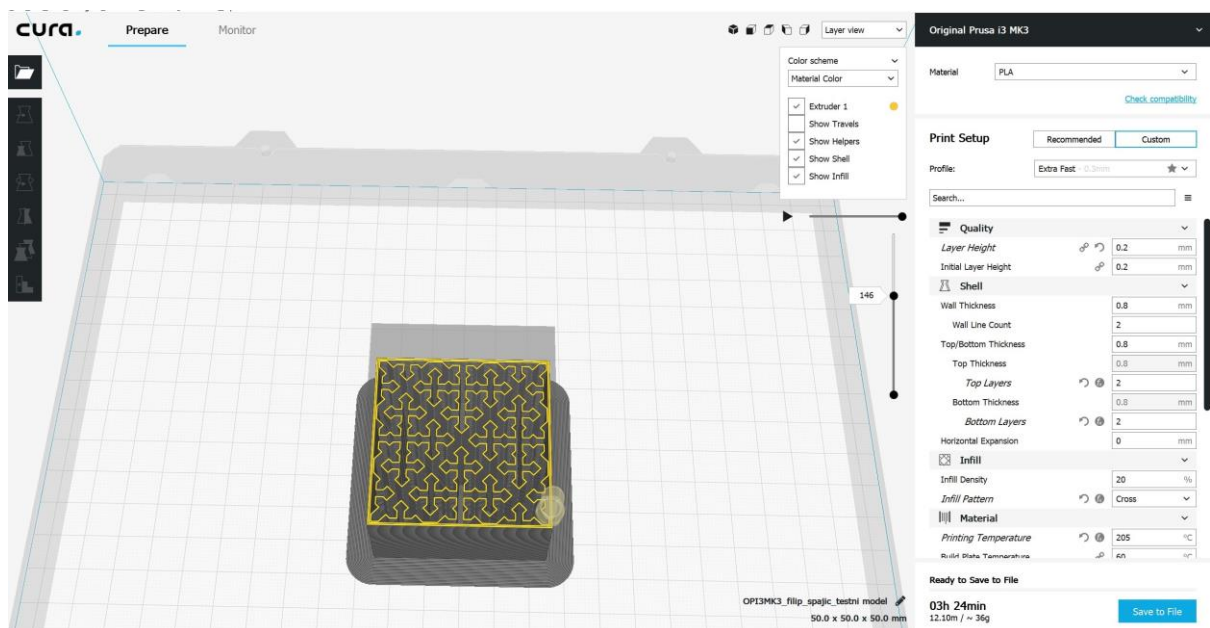


Slika 2.2 - Koncentrična ispuna od 40%

4.2 Križaste (Cross) ispuna

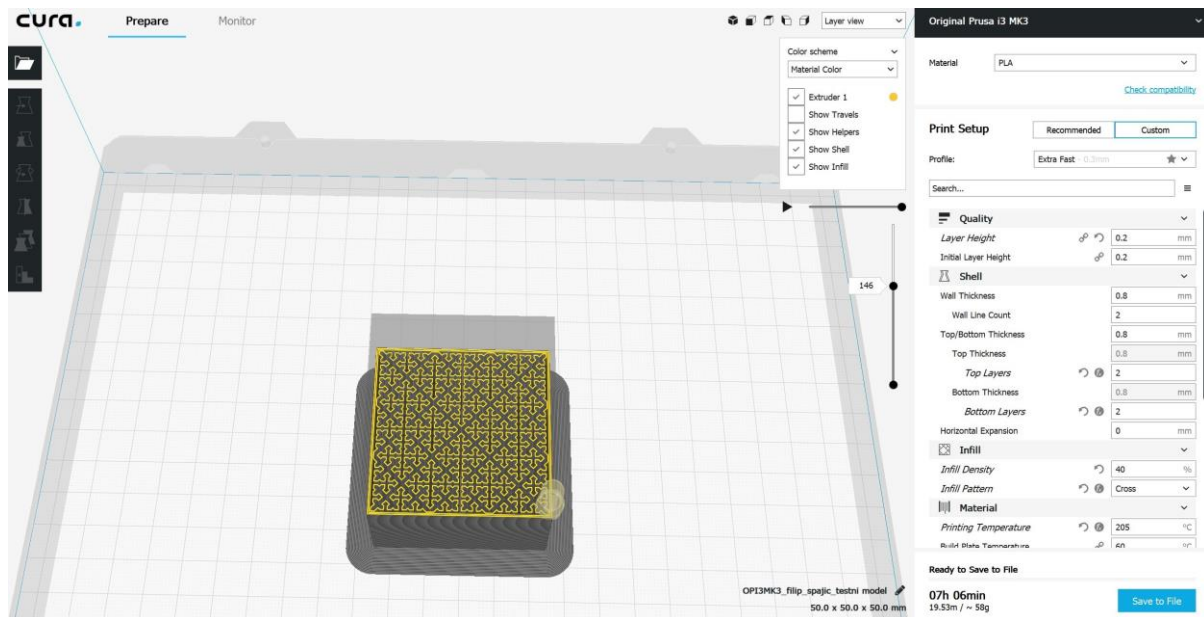
Za izradu korišteni su parametri Profila 1.

Kroz dane podatke vidi se potrošnja materijala od 12.10 metara što je 36 grama filameta. Proizvodnja cijelog objekta traje 3 sata i 24 minute na 20% ispune.



Slika 2.3 - Križaste ispuna od 20%

Na gustoći ispune od 40% se vidi da je potrošnja materijala 19.53 metara što je 58 grama filameta. Potrebno vrijeme za ispis objekta je 7 sati i 6 minuta.

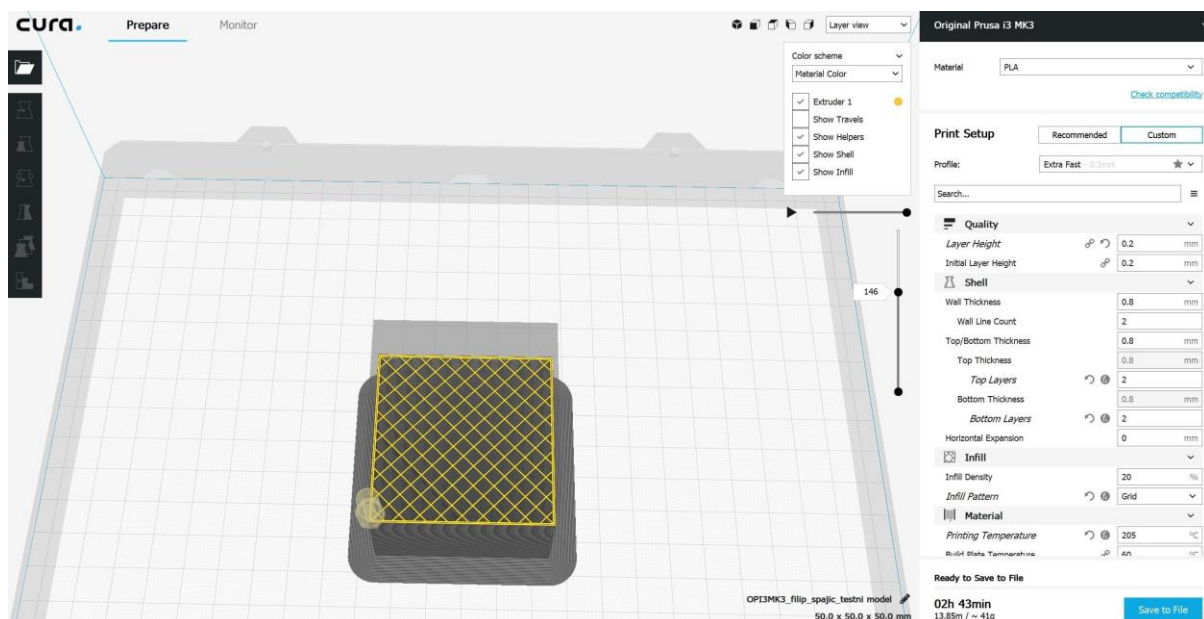


Slika 2.4 - Križaste ispuna od 40%

4.3 Mrežasta (Grid) ispuna

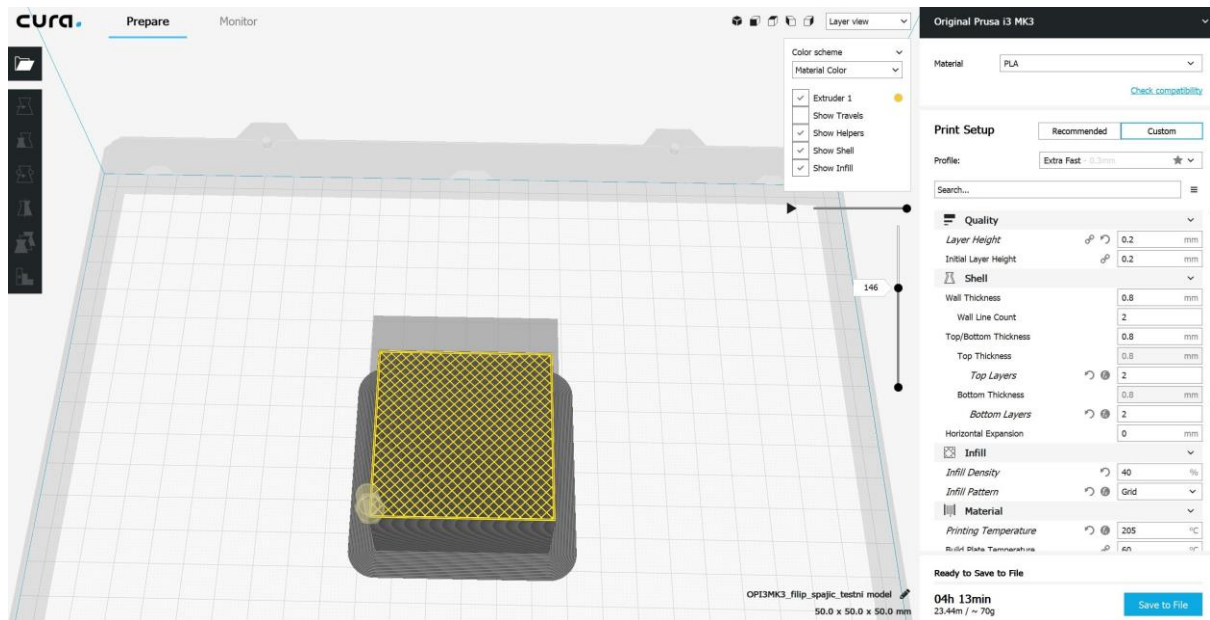
Za izradu korišteni su parametri Profila 1.

Iz podataka očitava se da je potrošnja materijala 13.85 metara što je ekvivalent 41 gramu filameta. Potrebno vrijeme za izradu ovog objekta je 2 sata i 43 minute na gustoći ispune od 20%.



Slika 2.5 - Mrežasta ispuna od 20%

Na gustoći ispune od 40% se vidi da je potrošnja materijala 23.44 metara što je 70 grama filameta. Potrebno vrijeme za ispis objekta je 4 sata i 13 minuta.

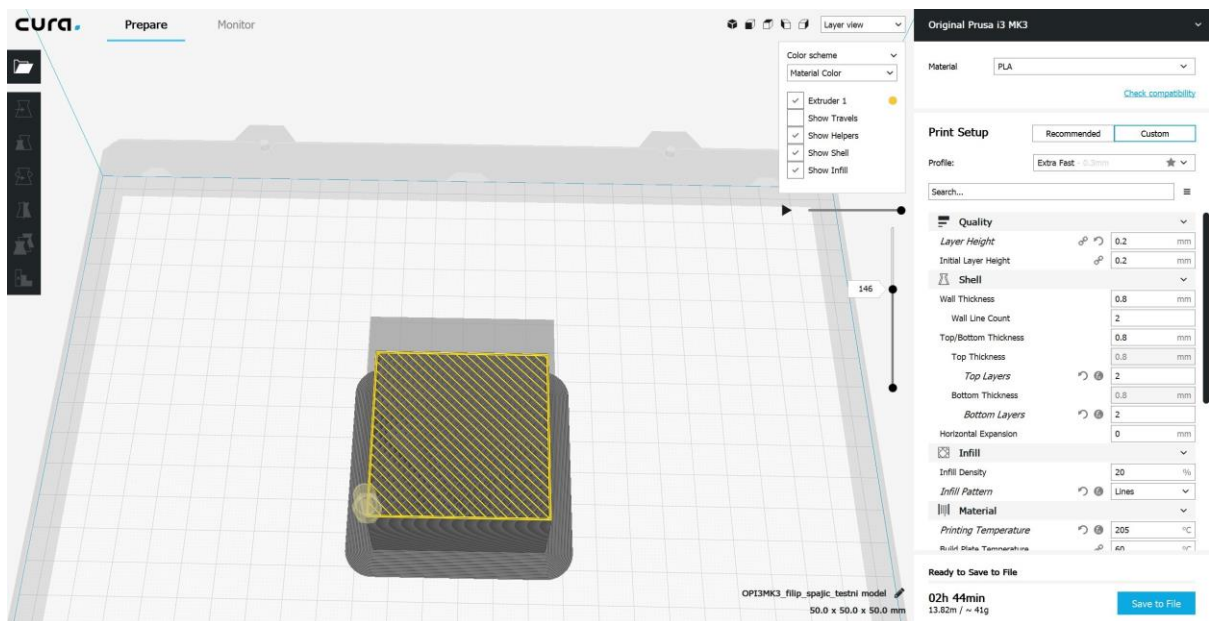


Slika 2.6 - Mrežasta ispuna od 40%

4.4 Linijska (Lines) ispuna

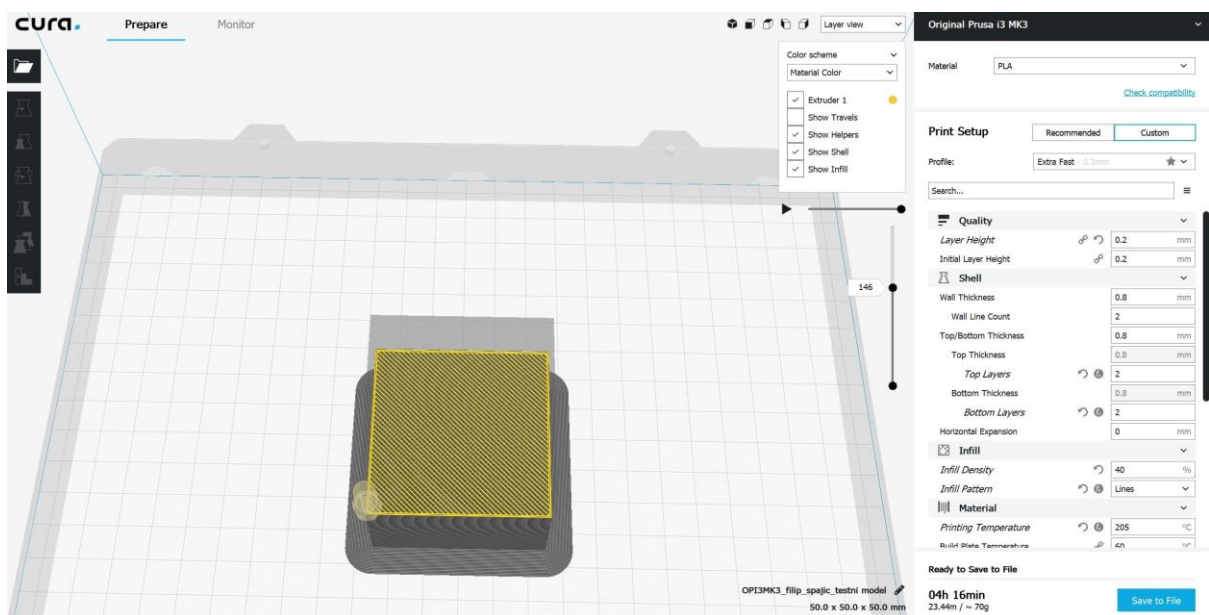
Za izradu korišteni su parametri Profila 1.

Očitava se iz priloženog se da je potrošnja materijala 13.82 metara što je ekvivalent 41 gramu filameta. Potrebno vrijeme za izradu ovog objekta je 2 sata i 44 minute na gustoći ispune od 20%.



Slika 2.7 - Linijska ispuna od 20%

Na gustoći ispune od 40% se vidi da je potrošnja materijala 23.44 metara što je 70 grama filameta. Potrebno vrijeme za ispis objekta je 4 sata i 16 minuta.



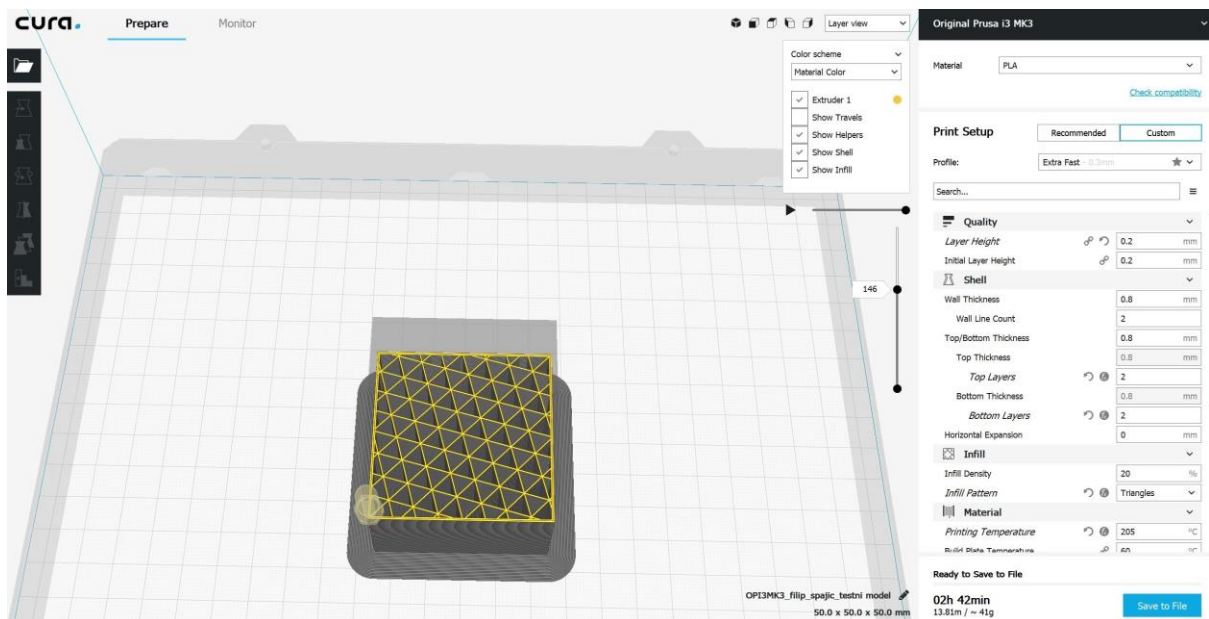
Slika 2.8 - Linijska ispuna od 40%

4.5 Trokutasta (Triangles) ispuna

Za izradu korišteni su parametri Profila 1.

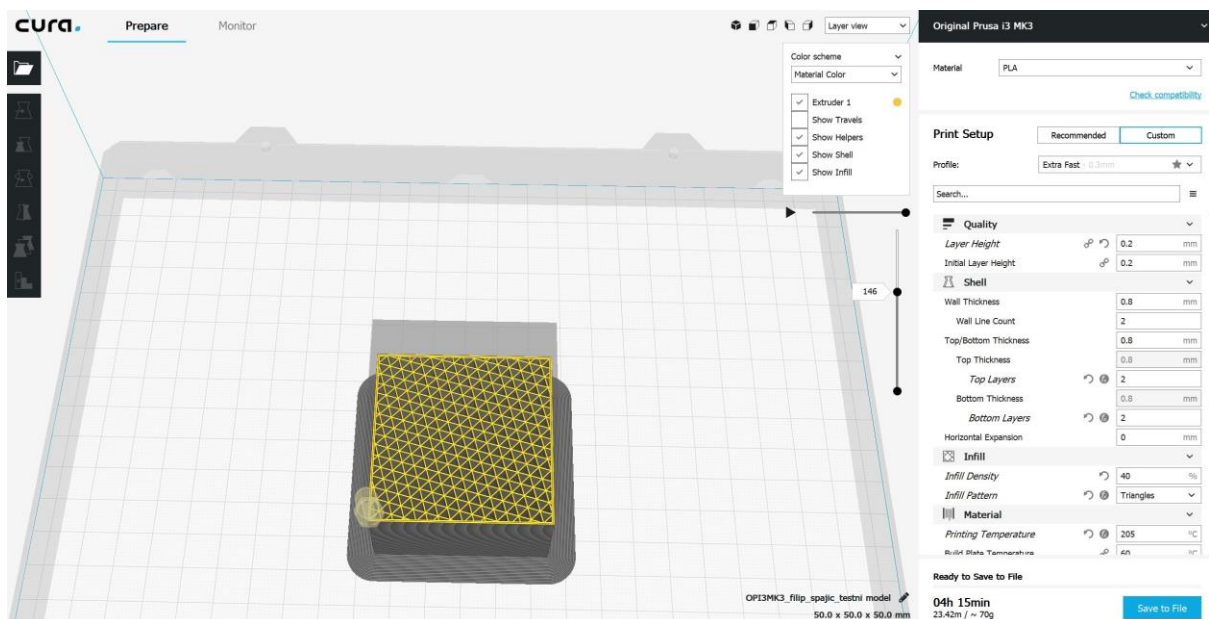
Podaci govore da je potrošnja materijala 13.81 metara što je ekvivalent 41 gramu filameta.

Potrebno vrijeme za izradu ovog objekta je 2 sata i 42 minute na gustoći ispune od 20%.



Slika 2.9 - Trokutasta ispuna od 20%

Na gustoći ispune od 40% se vidi da je potrošnja materijala 23.42 metara što je 70 grama filameta. Potrebno vrijeme za ispis objekta je 4 sata i 15 minuta.



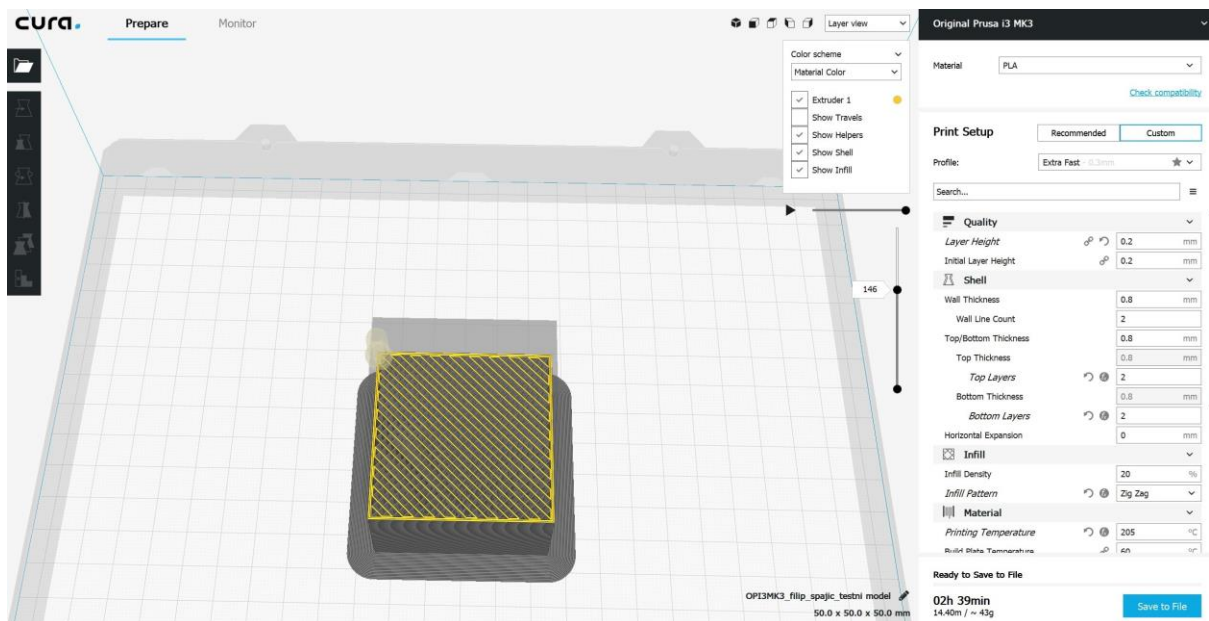
Slika 2.10 - Trokutasta ispuna od 40%

4.6 Cik Cak (Zig Zag) ispuna

Za izradu korišteni su parametri Profila 1.

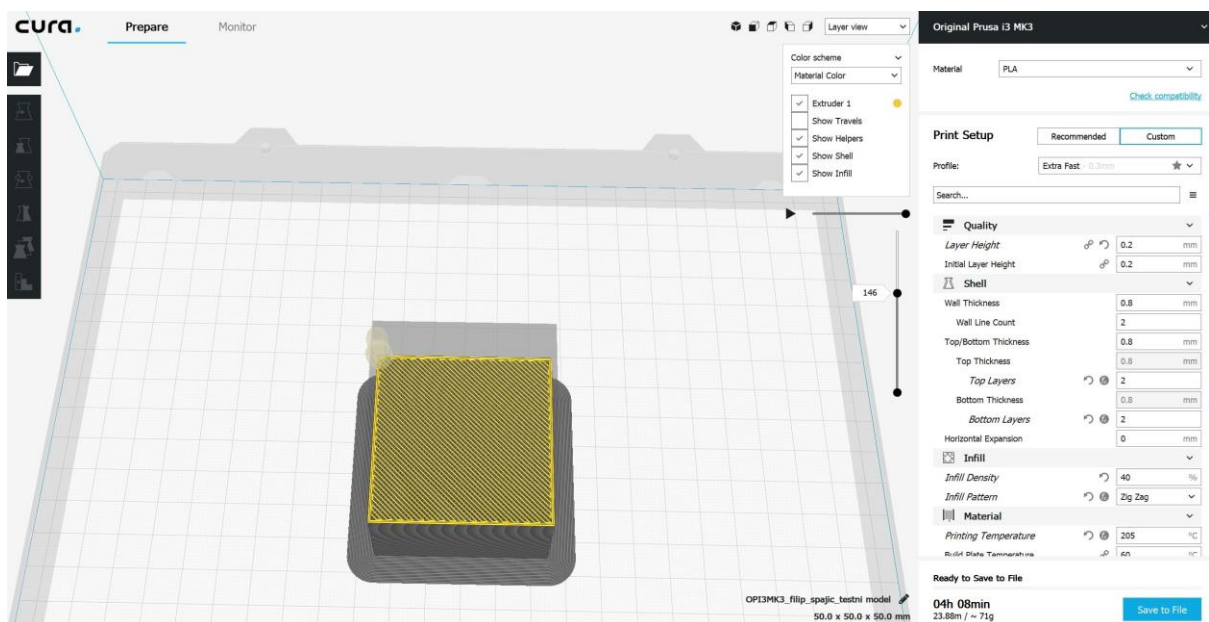
Podaci prikazuju da je utrošak materijala 14.40 metara što je ekvivalent 43 grama filameta.

Potrebno vrijeme za izradu ovog objekta je 2 sata i 39 minute na gustoći ispune od 20%.



Slika 2.11 – Cik Cak ispuna od 20%

Na gustoći ispune od 40% se vidi da je potrošnja materijala 23.88 metara što je 71 gram filamenta. Potrebno vrijeme za ispis objekta je 4 sata i 8 minuta.



Slika 2.12 – Cik Cak ispuna od 40%

4.7 Analiza

Kada se pogledaju svi podaci odjednom i izvuku se vremena izrade i potrošnja materijala, vidi se da su gotovo sve tehnike ispune veoma blizu jedna drugoj osim tehnike ispune Križ. Dok su ispune s sličnom prirodom varirale par minuta po vremenu izrade komplicirana priroda ispune Križ je katapultirala vrijeme proizvodnje za sat vremena više od ostalih. Potrošnja materijala varirala je po +/- 4 grama osim križa koji ima varijaciju za 3 grama, pa na više, ali manju potrošnju od ostalih tehnika. Kada se svi podaci stave u tablicu onda se može lakše vidjeti sve parametre svake ispune.

		Ispuna 20%		Ispuna 40%	
	Pločica	Materijal	Vrijeme	Materijal	Vrijeme
Cross	50 x 50 x 50	36g	3h 24min	58g	7h 06min
Concentric	50 x 50 x 50	39g	2h 28min	68g	4h 00min
Triangles	50 x 50 x 50	41g	2h 42min	70g	4h 15min
Grid	50 x 50 x 50	41g	2h 43min	70g	4h 13min
Lines	50 x 50 x 50	41g	2h 43min	70g	4h 16min
Zig Zag	50 x 50 x 50	43g	2h 39min	71g	4h 08min

5. ZAKLJUČAK

Istraživanje je uspješno provedeno u cilju zaključivanja potrošnje materijala i vremena izrade u različitim modelima ispune. Kao prvo svi testovi su uspješno izvedeni i konzistentni su s očekivanim vrijednostima. 3D geometrija oblika je stabilna i uspješno je potvrđena teorija o FFF tehnologiji kao jedna od najboljih i najisplativijih za printanje 3D objekata. Što se tiče eksperimenata svi su obavljeni bez ikakve kontaminacije i nepravilnosti u tisku.

Iz dobivenih vrijednosti se iščitava da je tehnika ispune Križ najduža za izraditi ali je i najjeftinija što se tiče utroška materijala, dok s druge strane najbrža tehnika je Koncentrična s drugim najmanjim utroškom materijala i najmanjim vremenom izrade. Prikaz u tablici pokazuje vrijednosti svake od odabranih tehnika ali ne i njihove funkcije. Dok je Križ najjeftinija tehnika, ona se primjenjuje u objektima koji zahtijevaju elastičnost, stoga se ne može koristiti u projektima gdje se zahtjeva tvrdoća objekta. Za tvrdoću bi prema rezultatima bila najbolja tehnika s Trokutastom ispunom, dok daje čvrstoću objektu ima i umjerenu potrošnju materijala i pristojno vrijeme izrade.

Svi rezultati se mogu primijeniti na dva načina: kućna izrada i industrijska. Ako se gleda iz perspektive kućne izrade onda bi bila poželjna što manja potrošnja materijala, naravno ako nije važna čvrstoća elementa nego samo njen izgled. Ako se orijentira prema industrijskoj proizvodnji onda dominira strukturna stabilnost i funkcionalnost objekta i tu se ne može toliko zanemariti oblik ispune kako bi se dobila jeftinija cijena izrade.

3D tisak je još relativno mlada tehnologija i puno napredaka se treba ostvariti u njoj. Svakim danom dizajneri oko svijeta traže načine za usavršavanjem tehnologije i inovacijom novijih, koje mogu poboljšati iskustva svakodnevnog čovjeka i zajednice koja se bavi 3D tiskom. Najbolja činjenica u svemu tome je, svi ljudi koji su kročili u svijet 3D printana inoviraju i istražuju različite postupke i načine kako poboljšati tehniku i iskustva drugih koji će se tek s njom upoznati.

6. LITERATURA

- [1] <https://reprap.org/wiki/RepRap> 15.5.2019.
- [2] <https://www.reprap.me/> 15.5.2019.
- [3] <https://ultimaker.com/software/ultimaker-cura> 15.5.2019.
- [4] Carl Bass, Foreward in Make: Design for 3D Printing, 2015
- [5] https://3dsourced.com/3d-printing-technologies/fused-deposition-modeling-fdm/#FDM_VS_FFF 15.5.2019.
- [6] Samuel N. Bernier; Bertier Luyt; Tatiana Reinhard, Make: Design for 3D Printing, maker Media, 2015., 3.
- [7] <https://www.makerbot.com/> 16.5.2019.
- [8] <https://3dsourced.com/guides/history-of-3d-printing/> 16.5.2019.
- [9] <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-fdm-3d-printing> 16.5.2019.
- [10] Ben Redwood, Filemon Schoffer, Brian Garret, The 3D Printing Handbook, 3D Hubs B.V., Multitude, Amsterdam 2017.
- [11] <https://all3dp.com/what-is-stl-file-format-extension-3d-printing/> 20.5.2019.
- [12] <https://www.rhino3d.com/nurbs> 20.5.2019.
- [13] <http://paulbourke.net/dataformats/obj/> 20.5.2019.
- [14] <https://www.core77.com/posts/71173/How-To-Find-the-Best-3D-Printing-Material-for-Your-Designs> 27.5.2019.
- [15] <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/key-design-considerations-3d-printing> 27.5.2019
- [16] <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/supports-3d-printing-technology-overview> 10.6.2019.
- [17] <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/post-processing-fdm-printed-parts> 10.6.2019.
- [18] <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/how-design-parts-fdm-3d-printing> 10.6.2019.

- [19] <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/how-does-part-orientation-affect-3d-print>
17.6.2019.
- [20] <https://all3dp.com/2/cura-infill-patterns-all-you-need-to-know/> 17.6.2019.
- [21] <https://ultimaker.com/en/resources/52670-infill> 24.6.2019. 25.6.2019.

7. PRILOZI